بهینه‌سازی سیستم‌های تولید هم‌زمان برق، حرارت و برودت (CCHP) بااستفاده از روشی ترکیبی و نوین*

محمدمصطفی غفوریان[۱]	حمید نیازمند[۲]

چکیده باتوجه به اهمیت انرژی و محدود بودن منابع موجود، برنامه‌ریزی مناسب برای گسترش استفاده از سیستم‌های پربازده امری اجتناب‌ناپذیر است. سیستم‌های CCHP ازجمله سیستم‌هایی است که به‌منظور بالا بردن راندمان تولید انرژی و کاهش هزینه‌های مربوط به‌کار می‌رود. از زمان ظهور این سیستم‌ها تا به امروز، روش‌های مختلفی به‌منظور تعیین ظرفیت تجهیزات و بهینه‌سازی آنها ارائه شده‌است. در پژوهش حاضر، پس‌از معرفی اجمالی روش‌های تعیین ظرفیت، شامل روش ماکزیمم بار (MLM)، روش ماکزیمم مستطیل (گرمایی $MRM_{,h}$ و الکتریکی $MRM_{,e}$) و روش یکنواخت سود سالیانه نسبی (REUAB) به ارائهٔ یک روش جدید به‌منظور بهینه‌سازی سیستم CCHP برای یک مجتمع مسکونی با محرک اولیه موتور گازسوز پرداخته می‌شود. در این روش سه معیار انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی به‌همراه ملاحظات مربوط به روش‌های گذشته بسط داده می‌شود و در انتها با اعمال شرایط واقعی برای محرک اولیه نتایج بهینه‌سازی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

واژه‌های کلیدی روش یکنواخت سود سالیانهٔ نسبی، روش ماکزیمم مستطیل، سیستم‌های CCHP.

Optimization of Combined Cooling Heating and Power System (CCHP) by a Novel Hybrid Method

M.M. Ghafurian	H. Niazmand

Abstract *The importance of energy and shortage of its sources have necessitated appropriate planning for developing systems with high efficiency. Combined cooling, heating and power generation systems CCHP, are systems that used for increasing the efficiency of generated energy, while decreasing costs. Since the invention off CCHP systems, different methods have been provided for determination capacity of equipment and their optimization. In this research, at first these systems summary are presented and then three main methods namely maximum load method (MLM), maximum rectangle method (heating $MRM_{,h}$ and electric $MRM_{,e}$) and relative equivalent uniform annual benefit method(REUAB), for determination of capacity of prime mover have been introduced. Then for a residential convened that its prime mover is gas engine, with consideration three mentioned methods and a new proposed method, for optimization the CCHP will be explained. Finally, the results of the optimization with applying real conditions for prime mover are investigated.*

Key Words Relative equivalent uniform annual benefit; Maximum rectangle method; CCHP systems.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۹/۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۸/۱۵ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v30i1.60627

(۱) دانشجوی دکتری مکانیک، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسندهٔ مسئول: استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد. niazmand@um.ac.ir

مقدمه

پس‌از افزایش عمده بهای سوخت در سه دههٔ اخیر، اهمیت بحث سوخت جایگزین، افزایش کارایی انرژی و کاهش آلودگی زیست‌محیطی، تمایل به استفاده از فناوری‌های جدید، ازجمله سیستم تولید هم‌زمان برق، گرما و سرما را افزایش داده‌است [1].

این سیستم‌ها وظیفهٔ تولید متوالی سه صورت مفید انرژی؛ یعنی حرارت، سرما و الکتریسیته را از یک منبع تولید انرژی به‌عنوان محرک اولیه (Prime mover) برعهده دارند که در اغلب کاربردهای مختلف، با مصرف یک نوع سوخت، انرژی شیمیایی آن را به انرژی مکانیکی و گرمایی تبدیل می‌کنند. معمولاً انرژی مکانیکی برای تولید الکتریسیته و انرژی گرمایی برای تولید بخار، آب گرم و یا هوای گرم مورد استفاده قرار می‌گیرد و بااستفاده از سیستم‌های تبرید و مصرف انرژی گرمایی یا الکتریسیته، سرمایش مورد نیاز فراهم می‌شود. از مزایای این سیستم‌ها می‌توان به تولید غیرمتمرکز و مستقل برق، گرما و سرمایش، جلوگیری از تلفات توزیع و انتقال در شبکهٔ سراسری، کاهش مصرف سوخت و افزایش رقابت در تولید برق و نیز کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی اشاره نمود [1-3].

پژوهش در حوزهٔ طراحی بهینهٔ سیستم‌های CCHP به سال‌ها دور برمی‌گردد. این پژوهش‌ها عمدتاً به طراحی و برآورد کلی استفاده از یک یا چند تکنولوژی خاص و نیز به ارتقای روش بهینه‌سازی این سیستم‌ها پرداخته‌اند [4-7]. درادامه به برخی از این پژوهش‌ها اشاره می‌شود.

صنایع و همکاران [8]، گیبسون و همکاران [9] و غفوریان و همکاران [6,10] در فرایند بهینه‌سازی سیستم‌های CHP و CCHP، نحوهٔ پوشش‌دهی منحنی‌های بار و عملکرد در بار نامی تجهیزات را به‌عنوان تحلیل انرژی بحث نمودند. آنها علاوه‌بر تحلیل انرژی به دورهٔ بازگشت سرمایه و نیز سود حاصل از این سیستم‌ها به‌عنوان معیار اقتصادی پرداختند. خلأهای موجود در پژوهش‌های آنها عدم درنظر گرفتن هزینه‌های اسقاطی، ثابت فرض نمودن بازده یا ضریب عملکرد تجهیزات، نادیده گرفتن شرایط محیطی بر عملکرد سیستم و انتشار آلاینده‌ها و درنهایت فرض ثابت بودن قیمت حامل‌های انرژی بود.

گروهی دیگر از محققان نظیر گو و همکاران [11] بااستفاده از روشی جدید تحت عنوان روش ماکزیمم مستطیل (Maximum rectangle method (MRM)) به طراحی سیستم CCHP برای کاربردهای مسکونی پرداختند. آنها در دو حالت عملکرد گرمایی و الکتریکی، بااستفاده از منحنی‌های تجمعی بارهای سالانه به تعیین ظرفیت محرک‌های اولیه پرداختند. شایان توجه است که در این روش هیچ‌گونه معیار اقتصادی و زیست‌محیطی در تعیین ظرفیت تجهیزات لحاظ نشده بود.

با گذر زمان، برخی دیگر از پژوهشگران در فرایند بهینه‌سازی این سیستم‌ها علاوه بر معیارهای اقتصادی و انرژی، معیار زیست‌محیطی را درنظر گرفتند و توابع هدف خود را اصلاح نمودند. گروهی نظیر گیبسون و همکاران [12]، معرفت و همکاران [13]، وانگ و همکاران [14] و فومو و همکاران [15] ازجمله محققانی بودند که آلایندهٔ CO_2 را به‌عنوان معیار زیست‌محیطی در فرایند بهینه‌سازی درنظر گرفتند و انتشار آلایندهٔ CO_2 را به‌عنوان یک جریمه در توابع هدف از سود حاصل کم نمودند.

پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که محققان معیار زیست‌محیطی را با درنظر گرفتن سه آلایندهٔ NO_x، CO_2 و CO در توابع هدف پیاده‌سازی می‌کنند تا به نتایج بهینه‌سازی اعتمادپذیرتری دست‌یابند. محققانی نظیر صنایع و غفوریان [16]، توکلی دستجرد و همکاران [17] در تحقیقات اخیر خود علاوه بر دو

معیار اقتصادی و انرژی، انتشار آلاینده‌های CO_2 ،NO_x و CO را در معیار زیست‌محیطی تابع هدف تکمیل نمودند؛ هرچند برخی از مشکلات نظیر فرض بازده ثابت تجهیزات، فرض ثابت بودن قیمت حامل‌ها و نیز نادیده گرفتن شرایط محیطی بر عملکرد تجهیزات، در پژوهش‌های آنها مشاهده می‌شد.

با مطالعهٔ عمیق‌تر پیشینهٔ روش‌های طراحی سیستم‌های CCHP، می‌توان دریافت ازجمله محدودیت‌های اساسی روش‌های ارائه‌شده ([8-10, 12-17]) عدم کارایی آنها در متغیر بودن قیمت حامل‌های انرژی و عدم کنترل معقول در فرایند بهینه‌سازی است. به‌طوری‌که در همهٔ پژوهش‌ها، قیمت حامل‌های انرژی ثابت فرض شده‌است. این در حالی است که قیمت حامل‌های انرژی در فصول مختلف برحسب نوع کاربری و میزان و زمان مصرف متفاوت می‌باشد. دلیل اصلی این فرض را می‌توان پایین بودن (نامتعادل بودن) قیمت حامل‌ها در برخی کشورها دانست که باعث می‌شود الگوریتم‌های بهینه‌سازی ظرفیت‌های نامعقولی (بالاتر از حد مورد نیاز) را برای تجهیزات به‌خصوص محرک اولیه انتخاب کنند. محققان برای رفع این مشکل، از میانگین قیمت در زمان پرباری و کم‌باری استفاده می‌کنند و نیز با محدود کردن حد بالا و پایین برای پارامتر طراحی ظرفیت نامی محرک اولیه، فرایند بهینه‌سازی را کنترل می‌کنند.

در این پژوهش با درنظر گرفتن کلیهٔ نواقص موجود در پژوهش‌های اخیر و با اعمال کامل سه معیار انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی به ارائهٔ یک روش ترکیبی جدید به‌منظور بهینه‌سازی سیستم‌های تولید هم‌زمان برق، حرارت و برودت پرداخته می‌شود. در این پژوهش فرض متغیر بودن بودن قیمت حامل‌های انرژی، تغییر عملکردی تجهیزات با ظرفیت نامی و شرایط محیطی اعمال می‌شود. در روش جدید کنترل فرایند بهینه‌سازی توسط روش ماکزیمم مستطیل در دو حالت عملکرد الکتریکی و گرمایی انجام می‌گردد و سپس فرایند بهینه‌سازی با روش سود یکنواخت سالیانهٔ نسبی مبنی بر تکنیک یکنواخت سالیانه انجام خواهد شد. درواقع نوآوری این پژوهش، شامل موارد زیر می‌شود:

- پیاده‌سازی روش‌های پیشین MRM و REUAC و ارائهٔ یک روشی ترکیبی جدید بااستفادهٔ هم‌زمان از این دو روش.
- بررسی دو حالت الکتریکی و گرمایی برای روش ماکزیمم مستطیل در ترکیب با روش REUAC.
- مقایسه دو فرایند بهینه‌سازی در انتخاب محرک اولیه با قرار دادن تعداد محرک اولیه به‌عنوان پارامتر طراحی (با ظرفیت‌های متفاوت) در هر کدام از روش‌ها (در مجموع چهار حالت).
- بررسی درصد تغییرات نتایج بهینه‌سازی، با تغییر در شرایط محیطی بر عملکرد محرک اولیهٔ سیستم CCHP.
- بررسی درصد تغییرات پارامترهای طراحی با افزایش ۱۰ درصدی قیمت حامل‌های انرژی و مقایسهٔ آن با دیگر روش‌ها.

روش‌های تعیین ظرفیت سیستم‌های CCHP

با پیشرفت تکنولوژی و پیدایش سیستم‌های تولید پراکنده به‌منظور تأمین بارهای موردنیاز محل مصرف، روش‌های گوناگونی برای تعیین ظرفیت تجهیزات به‌ویژه محرک اولیه ارائه شده‌است که درادامه به سه روش رایج پرداخته می‌شود.

***روش ماکزیمم بار* (Maximum load method (MLM)**. در روش ماکزیمم بار، الکتریسیتهٔ مورد نیاز با خریداری از شبکهٔ الکتریسیته، گرمایش توسط بویلر با خرید سوخت از شبکهٔ گاز و سرمایش توسط سیستم‌های سرمایشی در مکان مورد نظر فراهم

می‌شود؛ به‌طوری‌که برای تعیین ظرفیت تجهیزات گرمایشی و سرمایشی از نقطهٔ پیک منحنی‌های بار گرمایشی و سرمایشی استفاده می‌شود. متأسفانه در ایران، نوعاً انتخاب تجهیزات براساس این روش می‌باشد که نواقصی نظیر اتلافات بالا، هزینهٔ اولیهٔ بالا و غیره را شامل می‌شود [18].

روش ماکزیمم مستطیل (MRM). از دیگر روش‌های تعیین ظرفیت محرک اولیه روش ماکزیمم مستطیل می‌باشد که به دو دستهٔ الکتریکی (MRM_e) و گرمایی (MRM_h) تقسیم می‌شود. در روش ماکزیمم مستطیل گرمایی بارهای گرمایی مورد نیاز محل مصرف (H_dem) و در روش ماکزیمم مستطیل الکتریکی بارهای الکتریسیتهٔ مورد نیاز محل مصرف (E_dem) برحسب مقیاس زمانی موجود، مطابق با روابط (۱ و ۲)، به‌صورت نزولی رسم می‌شوند. سپس با انتخاب بزرگ‌ترین مستطیل در زیر هر منحنی، ظرفیت نامی و زمان عملکرد محرک اولیه به‌دست می‌آید. به‌طوری‌که ارتفاع مستطیل نشان‌دهندهٔ ظرفیت نامی محرک اولیه و عرض آن عملکرد زمانی محرک اولیه در بار کامل می‌باشد.

$$\mathrm{ATD}(t) = \mathrm{H_dem(t)} + \alpha \times \frac{\mathrm{C_dem(t)}}{\mathrm{COP_A}} \qquad (۱)$$

$$\mathrm{AED}(t) = \mathrm{E_dem(t)} + \alpha \times \frac{\mathrm{C_dem(t)}}{\mathrm{COP_E}} \qquad (۲)$$

در واقع استفاده از روابط (۱ و ۲) و نیز ضریب α، به‌منظور تخمین کلی از بارهای مصرفی در مقیاس زمانی می‌باشد؛ به‌طوری‌که با برابر یک قرار دادن ضریب α، میزان بار سرمایشی مورد نیاز (C_dem) به منحنی‌های تجمعی الکتریسیته و گرما اضافه می‌گردد و طراحی برمبنای حداکثر نیازهای گرمایی یا الکتریکی به‌همراه بار سرمایشی خواهد بود و در صورت صفر بودن آن، طراحی برمبنای حداقل نیازها خواهد بود.

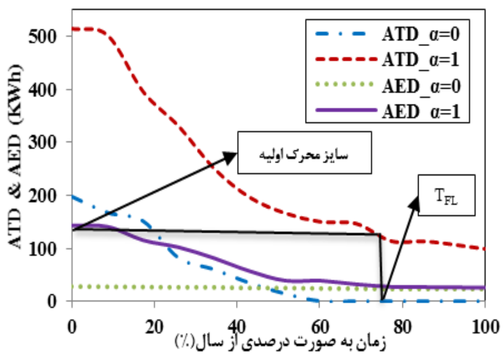
منحنی‌های تجمعی گرمایی (ATD) و الکتریکی (AED) حاصل از این دو رابطه در شکل (۱) برای چهار حالت عملکرد گرمایی و الکتریکی و با فرض اعمال بار سرمایشی (صفر و یک بودن ضریب α) ارائه شده‌است.

به منظور محاسبهٔ ماکزیمم مستطیل ($A_{MRM,max,i}$) انتخابی در این روش از رابطهٔ (۳) استفاده می‌شود و درنهایت به‌کمک رابطهٔ (٤) ظرفیت نامی محرک اولیه مشخص می‌گردد. در روش ماکزیمم مستطیل الکتریکی، $E_{MRM,e}$ همان ظرفیت نامی محرک اولیه (E_{nom}) می‌باشد؛ درحالی‌که در روش ماکزیمم مستطیل گرمایی $H_{MRM,h}$ معادل ظرفیت نامی محرک اولیه‌ای است که این میزان گرمای $H_{MRM,h}$ را تولید کند. شکل (۲) این روند را برای چهار حالت در دو شرایط عملکرد گرمایی (MRM_h) و الکتریکی (MRM_e) نشان می‌دهد [18, 19].

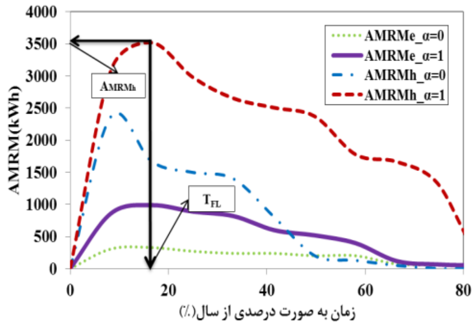
$$A_{MRM_i(kwh)} = \mathrm{ATD(or\ AED)}(kW) \times T_{FL}(\%) \qquad (۳)$$

$$\begin{cases} E_{MRM,e} = \dfrac{A_{MRM,max,e}}{T_{FL}(\%)} & ,E_{nom} = E_{MRM,e} \\ H_{MRM,h} = \dfrac{A_{MRM,max,h}}{T_{FL}(\%)} & ,E_{nom} = f\left(H_{MRM,h}\right) \end{cases} \qquad (٤)$$

که در این روابط $T_{FL}(\%)$ زمان عملکرد در بار کامل می‌باشد.



شکل ۱ منحنی تجمعی برای دو نوع گرمایشی و الکتریکی در دو حالت α=۰ و α=۱



شکل ۲ منحنی مساحت‌های به‌دست‌آمده از منحنی تجمعی

شایان توجه است که با فرض α=۰ و α=۱ به‌ترتیب حد پایین و بالا برای تعیین ظرفیت نامی مطلوب محرک اولیه، و نیز پوشش‌دهی بارهای سالانه مشخص می‌گردد.

روش سود سالیانهٔ یکنواخت نسبی (REUAB).
(Relative equivalent uniform annual benefit)
روش سود سالیانهٔ یکنواخت نسبی، که اخیراً توسط صنایع و غفوریان [17] معرفی شده‌است، یکی از کامل‌ترین روش‌ها در طراحی سیستم‌های CCHP است. این روش ترکیبی از سه معیار انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی و نیز روش ماکزیمم بار (MLM) می‌باشد که با معرفی شاخصی مبنی بر سود سالانهٔ سیستم تولید هم‌زمان برق، گرما و سرما نسبت‌به سیستم‌های سنتی (که توسط روش MLM تعیین ظرفیت می‌شود)، ظرفیت بهینهٔ سیستم را تعیین می‌کند. این روش برمبنای تکنیک یکنواخت سالیانه (Equivalent uniform annual(EUA)) می‌باشد که یکی از فنون با ارزش تحلیل‌های اقتصادی است. در این روش درآمدها و هزینه‌های سیستم به دریافت و پرداخت سالیانه تبدیل می‌شوند. از مزایای این فن نسبت‌به دیگر فنون اقتصادی، نتیجهٔ یکسان محاسبات پروژه‌ها، با عمر متفاوت است. جزئیات مربوط به این فن در مرجع [21] موجود می‌باشد.

تابع هدف استفاده‌شده در روش سود سالیانه یکنواخت نسبی اختلاف بین هزینه‌ها و درآمدهای کل سیستم سنتی $EUAB_{trad}$ و هزینه‌ها و درآمدهای کل سیستم تولید هم‌زمان $EUAB_{CCHP}$ در طول یک سال می‌باشد که به‌صورت رابطهٔ (۵) تعریف می‌شود:

$$REUAB\left(\frac{\$}{year}\right) = EUAB_{trad} - EUAB_{CCHP} \qquad (۵)$$

که $EUAB_{trad}$ اختلاف هزینه‌ها و درآمدهای سیستم سنتی (متداول) را نشان می‌دهد که برای پوشش‌دهی بارهای گرمایش، سرمایش و الکتریسیتهٔ محل مصرف، با رابطهٔ (٦) تخمین زده می‌شود. نکتهٔ قابل اهمیت در این روش، انتخاب ظرفیت نامی سیستم سرمایش است که برای این منظور، دو حالت هزینه‌ای بررسی می‌شوند؛ حالت اول تأمین سرمایش فقط با چیلر تراکمی و حالت دوم تأمین سرمایش فقط با چیلر جذبی است و هر کدام از این دو حالت که مقدار هزینهٔ کمتری داشته باشد، به‌عنوان سیستم انتخابی درنظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} EUAB_{trad} &= \sum_{j=1}^{T}[E_{buy} \times \rho_{e,buy} + m_f \times \rho_f \\ &+ \sum_{k=1}^{3}(m_{trad}^{k} \times \varepsilon_k)] \times \tau \\ &+ \sum_{r=1}^{P}[M + R - A]_r \times Nc_r \times n_r \end{aligned} \qquad (٦)$$

در این رابطه، هزینه‌ها شامل هزینه‌های تعمیرات و نگه‌داری، هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و اسقاطی، هزینه‌های مصرف سوخت (ρ_f) و خرید الکتریسیته ($\rho_{e,b}$) و جریمهٔ انتشار آلاینده‌ها می‌باشد. r شمارندهٔ نوع تجهیزات و n تعداد آنها و ε_k فاکتور جریمهٔ انتشار آلاینده می‌باشد که مقدار آن در جدول (۱) برحسب نوع آلاینده ارائه شده‌است.

R هزینهٔ اولیهٔ سالیانه است که توسط رابطهٔ (۷) به‌دست می‌آید [21].

$$R = CRF \times Co \tag{۷}$$

CRF (Capital-Recovery Factor) فاکتور بازیافت سرمایه می‌باشد که توسط رابطهٔ (۸) محاسبه می‌شود [21].

$$CRF = \frac{i(1+i)^k}{(1+i)^k - 1} \tag{۸}$$

جدول ۱ فاکتور جریمهٔ انتشار آلاینده‌ها [17]

پارامتر	علامت	مقدار
فاکتور انتشار آلاینده NOx($/kg)	ε_{NOx}	۶/۸۵۳
فاکتور انتشار آلاینده CO ($/kg)	ε_{CO}	۰/۰۲۰۸۶
فاکتور انتشار آلاینده CO_2 ($/kg)	ε_{CO_2}	۰/۰۲٤

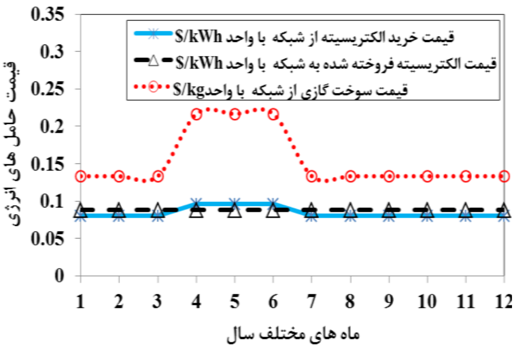
درحقیقت فاکتور بازیافت سرمایه، سرمایهٔ اولیهٔ تجهیزات (Co) را باتوجه به نرخ بهره (i)، در مدت (k) دوره به پرداخت‌های مساوی یکنواخت توزیع می‌کند. A نیز، هزینه سالانه اسقاطی است که توسط رابطهٔ (۹) ارزیابی می‌شود [21]:

$$A = SV \times \left[\frac{i}{(1+i)^k - 1}\right] \tag{۹}$$

درحقیقت درآمد یکنواخت سالیانه (Equivalent uniform income) در سیستم سنتی، تنها ناشی از هزینه اسقاطی تجهیزات است. از طرف دیگر، هزینهٔ یکنواخت سالیانهٔ سیستم تولید هم‌زمان برق، حرارت و برودت ($EUAB_{CCHP}$) توسط رابطهٔ (۱۰) تعریف می‌شود که مشابه رابطهٔ سیستم‌های تولید متداول است، اما تفاوت آن در فروش الکتریسیته و تجهیزات سیستم است که در درآمد یکنواخت سالیانهٔ سیستم CCHP محسوب خواهد شد.

$$\begin{aligned} EUAB_{CCHP} &= \sum_{j=1}^{T}[E_{buy} \times \rho_{e,buy} - E_{sell} \times \rho_{e,sell} \\ &+ m_f \times \rho_f + \sum_{k=1}^{3}(m_{CCHP}^{k} \times \varepsilon_k)] \\ &\times \tau \sum_{r=1}^{P} M + R - A_r \times Nc_r \times n_r \end{aligned} \tag{۱۰}$$

$\rho_{e,s}$ و $\rho_{e,b}$ به‌ترتیب بهای فروش و خرید الکتریسیته و ρ_f بهای سوخت گازی است که در شکل (۳) به‌صورت ماهانه ارائه شده‌است.



شکل ۳ قیمت حامل‌های انرژی در ماه‌های مختلف [22, 24]

درواقع روش سود سالیانهٔ یکنواخت نسبی باتوجه به اطلاعات طرح، تحت نام هزینه‌ها و درآمدهای یکنواخت سالیانه و با درنظر گرفتن سه معیار انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی (که شامل: مشخصات عملکرد تجهیزات، پوشش‌دهی کامل منحنی‌های بار، آلاینده‌های تولیدی، شرایط محیطی، خرید و تعمیر و نگه‌داری تجهیزات، قیمت حامل‌های انرژی، هزینه‌های خرید الکتریسیته و مصرف سوخت و نیز درآمد حاصل از فروش الکتریسیته و هزینه‌های اسقاطی است) به بهینه‌سازی سیستم CCHP با هدف ماکزیمم کردن تابع هدف REUAB می‌پردازد. از نواقص این روش عدم کنترل فرایند بهینه‌سازی در تعیین ظرفیت نامی محرک اولیه می‌باشد به‌طوری‌که اگر قیمت حامل‌های انرژی افزایش یابد، این روش پیش‌بینی مناسبی از ظرفیت تجهیزات به‌ویژه محرک اولیه نخواهد داشت [16]. توضیحات بیشتر در بخش‌های بعدی ارائه خواهد شد.

روش ترکیبی جدید (MRM & REUAB). باتوجه به مباحث مطرح‌شده درزمینهٔ کنترل فرایند بهینه‌سازی به‌خصوص ظرفیت نامی محرک اولیه، روشی جدید به‌منظور بهینه‌سازی سیستم‌های تولید هم‌زمان برق، حرارت و برودت ارائه می‌شود. در این روش کنترل

فرایند بهینه‌سازی توسط روش ماکزیمم مستطیل انجام می‌گردد. به‌طوری‌که حد بالا و پایین پارامترهای طراحی مربوط به ظرفیت نامی موتور گازسوز، توسط ظرفیت‌های انتخابی روش ماکزیمم مستطیل گرمایی و الکتریکی انتخاب می‌شوند و سپس فرایند بهینه‌سازی با تابع هدف چندمعیاره REUAB اعمال می‌شود. این روند در رابطهٔ (١١) ارائه شده‌است.

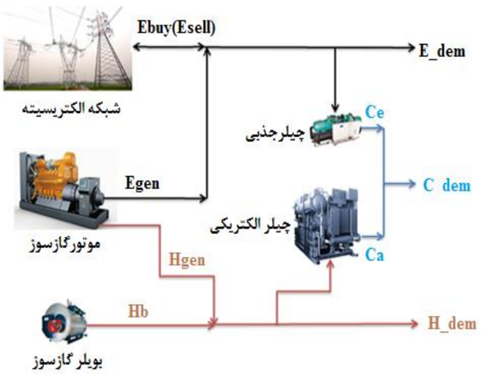
$$\begin{cases} Max\{REUAB\} = (n_j \times E_{nom})^{opt} \\ Min\{E_{MRM_i}\} < n_j \times E_{nom} < Max\{E_{MRM_i}\} \end{cases} \quad (١١)$$

اندیس i در $\mathrm{MRM_i}$ نشان‌دهندهٔ، انتخاب محرک اولیه براساس پوشش‌دهی بارهای الکتریکی (MRM_e) و گرمایی (MRM_h) است.

با اعمال این روش، اعتمادپذیری به نتایج الگوریتم بهینه‌سازی افزایش می‌یابد؛ زیرا ظرفیت انتخابی در محدودهٔ نیازهای ساختمان (از نقطه‌نظر زمان عملکرد و پیک مصرفی) انتخاب می‌شود. از طرفی اگر قیمت الکتریسیته و حامل‌های انرژی تناسب مورد نیاز را نداشته باشند، فرایند بهینه‌سازی، ظرفیت‌های نامعقولی را پیشنهاد نخواهد داد. به‌عبارتی دیگر، اگر فرض شود قیمت حامل‌های انرژی پایین باشد، فرایند بهینه‌سازی ظرفیت‌های بسیار پایین را انتخاب خواهد نمود که در مقیاس مطالعهٔ موردی، کاربرد ندارد و هزینهٔ طراحی سیستم بالاتر از هزینهٔ نصب و راه‌اندازی آن خواهد شد. این بدین معنی است که فرایند ترجیح می‌دهد که کلیهٔ الکتریسیته مورد نیاز ساختمان را با خریداری از شبکه تأمین کند، زیرا از نقطه‌نظر اقتصادی توجیه‌پذیرتر است. از طرفی اگر قیمت حامل‌های انرژی تناسب نداشته باشند، به‌طوری‌که قیمت سوخت خیلی پایین‌تر از هزینهٔ خرید الکتریسیته باشد، فرایند بهینه‌سازی، ظرفیتی بسیار بزرگ انتخاب خواهد نمود. این مشکل نیز زمانی که تناسبی بین هزینهٔ حامل‌های انرژی و هزینهٔ اولیه تجهیزات برقرار نباشد، به‌وجود می‌آید. از طرفی دیگر با اعمال این روش افزایش نامتعارف ظرفیت نامی موتور گازسوز با افزایش هزینهٔ حامل‌های انرژی قابل کنترل می‌باشد.

مدل‌سازی سیستم CCHP

عملکرد سیستم CCHP براساس چیدمان تجهیزات و تداخل آن با شبکه تعیین می‌شود. هرچند که پارامترهای مشخصهٔ عملکردی محرک اولیه نظیر بازده حرارتی، قدرت نامی و مقدار حرارت قابل بازیافت نقش مؤثری خواهند داشت [12]. شکل (٤) شماتیکی از سیستم سه‌گانه در تداخل با شبکه را نشان می‌دهد. استراتژی عملکرد این سیستم بدین صورت است که الکتریسیتهٔ مورد نیاز ساختمان توسط موتور گازسوز (E_{gen}) تأمین می‌شود و اگر الکتریسیتهٔ اضافی مورد نیاز باشد، با خریداری از شبکه (E_{buy}) تأمین خواهد شد. در غیر این صورت الکتریسیتهٔ اضافی درصورت عدم نیاز مجموعه (E_{sell}) به شبکهٔ سراسری فروخته می‌شود. این استراتژی توسط رابطهٔ (١٢) بیان شده‌است.



شکل ٤ شماتیک سیستم CCHP تداخل با شبکه

$$\begin{cases} E_{sell} = E_{demt} - E_{gen} \quad , \quad E_{buy} = 0 \\ \quad if E_{gen} > E_{demt} \\ E_{buy} = E_{gen} - E_{demt} \quad , \quad E_{sell} = 0 \\ \quad if E_{gen} < E_{demt} \end{cases} \quad (١٢)$$

E_{demt} توسط رابطهٔ (۱۳) محاسبه می‌شود که مجموع الکتریسیتهٔ بخش روشنایی (E_{dem}) و نیز بخش سرمایش است.

$$E_{demt} = E_{dem} + c_{dem}/COP_e \quad (۱۳)$$

حرارت به‌دست‌آمده از سیستم خنک‌کاری و گازخروجی موتور گازسوز (H_{gen})، می‌تواند برای تأمین نیازهای گرمایشی استفاده شود و درصورت کمبود گرمایش، از طریق بویلر پشتیبان (H_b) تأمین خواهد شد.

سرمایش مورد نیاز (C_{dem}) هم درصورت اضافه بودن گرمای تولیدی محرک از طریق چیلر جذبی (C_a) و در صورت کمبود، از طریق الکتریسیتهٔ اضافی یا خریداری از شبکه، توسط چیلر الکتریکی (C_e) تأمین خواهد شد که روابط مربوط به این استراتژی در زیر آورده شده‌است.

$$\begin{cases} if\ \ H_{gen} < H_{dem} \rightarrow \begin{cases} C_e = C_{dem} \\ H_b = H_{dem} - H_{gen} \\ C_a = 0 \end{cases} \\ H_{gen} > H_{dem} \rightarrow \begin{cases} C_e = C_{dem} - C_a \\ H_b = 0 \\ C_a = (H_{gen} - H_{dem}) \times COP_{ab} \end{cases} \end{cases} \quad (۱٤)$$

تحلیل انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی. انتخاب بهینهٔ سیستم CCHP علاوه‌بر تحلیل‌های انرژی مستلزم آنالیزهای اقتصادی و زیست‌محیطی می‌باشد. همان‌طور که گفته شد پارامترهای مشخصهٔ عملکردی تجهیزات به‌خصوص محرک اولیه نظیر بازده حرارتی، قدرت نامی و مقدار حرارت قابل بازیافت نقش مؤثری در طراحی سیستم‌های CCHP دارد. از این‌رو روابط مربوط به عملکرد موتور گازسوز، به‌منظور اعمال استراتژی بیان‌شده در جدول (۲) آورده شده‌است. این روابط بااستفاده از داده‌های واقعی مربوط به تجهیزات تجاری به‌دست آمده‌است.

جدول ۲ روابط مربوط به مشخصات فنی موتور گازی [7, 19].

توصیف	رابطه	متغیر x	متغیر y
		(kW)	
$y \le 100$	$y = 0.578x - 8.422$	H_{gen}	E_{gen}
$100 < y \le 3500$	$y = 6\times10^{-5}x^2 + 0.7401x$		
$x \le 100$	$y = 2.65x - 21.44$	E_{gen}	F
$100 < x \le 3500$	$y = -7\times10^{-5}x^2 + 2.727x$		

همچنین مشخصه‌های عملکردی بویلر و چیلرهای جذبی و تراکمی توسط روابط زیر ارزیابی می‌شوند:

$$\eta_{nom,b} = 0.03234 \times \mathrm{Log}(H_{b,nom}) + 0.6387 \quad (۱٥)$$

$$COP_{nom,a} = 10^{-8} \times C_{om,a}{}^{2} + 7 \times 10^{-5} \times C_{nom,a} + 0.6493 \quad (۱٦)$$

$$COP_{nom,e} = 1.5243 \times C_{nom,e}{}^{0.1012} \quad (۱۷)$$

که $H_{b,nom}$، $C_{nom,e}$ و $C_{nom,a}$ به‌ترتیب ظرفیت نامی بویلر پشتیبان، چیلر الکتریکی و چیلر جذبی است.

در تحلیل اقتصادی این پژوهش از تکنیک یکنواخت سالیانه استفاده شده‌است که کلیهٔ معیارهای اقتصادی نظیر ارزش زمانی پول، هزینه‌ها و درآمدها و نیز عمر سیستم را درنظر می‌گیرد. برای این منظور هزینهٔ سرمایه‌گذاری اولیهٔ تجهیزات سیستم تولید هم‌زمان، هزینه‌های عملکردی، اسقاطی و تعمیرات نگه‌داری در جدول (۳) ارائه شده‌است.

آنالیز زیست‌محیطی انجام‌گرفته براساس مقدار Co_2 ,Co و No_x تولیدشدهٔ ناشی از احتراق سوخت گازی در محفظه‌های احتراق می‌باشد که اثر این آلودگی به‌صورت یک جریمه به هزینهٔ کل سیستم اضافه خواهد شد.

جدول ۳ هزینه‌های اولیهٔ تجهیزات، نسبت‌به ظرفیت نامی، به‌همراه هزینه‌های تعمیر و نگه‌داری [17]

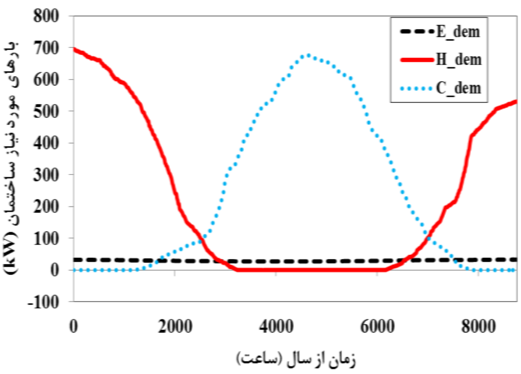
تجهیزات	معادلات هزینهٔ اولیه و تعمیر و نگه‌داری و اسقاطی
موتور گازسوز	$Co = 1.1(1.881\times10^{21} \times E_{nom}^{-10.33} + 1.062\times10^{7}),\quad 50< E_{nom} < 500kW$ $Co = -138.7Ln(E_{nom}) + 1727.1,\quad 500kW < E_{nom} < 5000kW$ $M = \frac{0.40458+324890/E_{nom}}{12260}$ SV=0.2×Co
بویلر	$Co = 205H_B^{-0.13}$ $, M = 0.0027\$/kWh$ SV=0.2×Co
چیلر جذبی	$Co = 540(C_{nom,ab})^{-0.128}$ $,M=0.003\$/kWh$ SV=0.12×Co
چیلر الکتریکی	$Co = 482(C_{nom,com})^{-0.07273} - 159.7$ $,M=0.003\$/kWh$ SV=0.12×Co

در این پژوهش، به‌منظور جلوگیری از تشکیل محصولات مضر، یک محدودیت دمایی برای اگزوز تجهیزات حرارتی (با فرض بازیافت گرما برای موتور گازسوز) درنظر گرفته شده‌است. نکتهٔ حائز اهمیت دمای نقطهٔ شبنم محصولات می‌باشد. دمای نقطهٔ شبنم محصولات احتراق نیز وابسته به عواملی چون میزان هوای اضافه، رطوبت، دی اکسید کربن محصولات احتراق و عوامل دیگر است و مطابق با استانداردهای طراحی تجهیزات حرارتی، دمای خروجی اگزوز باید ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد از دمای نقطهٔ شبنم محصولات خروجی بالاتر باشد؛ لذا با ضریب اطمینان مناسب، فرض می‌شود، دمای گاز خروجی برای محرک‌های اوّلیه از مقدار ۱۴۸/۸ درجهٔ سلسیوس و برای بویلرها از ۱۲۱ درجهٔ سلسیوس نباید کمتر شود [16, 20].

مطالعهٔ موردی. مطالعهٔ موردی درنظر گرفته‌شده در این پژوهش، یک مجتمع مسکونی در تهران می‌باشد. این ساختمان شامل ۸ طبقه و هر طبقه شامل ٤ واحد به مساحت $۱۲۰m^2$ می‌باشد که مشخصات آن در جدول (٤) آورده شده‌است. منحنی برق، حرارت و برودت ماهانه ساختمان در کل سال، در شکل (٥) نشان داده شده‌است.

جدول ٤ مشخصات ساختمان مدل‌سازی‌شده در نرم‌افزار کریر [25]

پارامتر	نوع و مقدار
میانگین ارتفاع سقف	۲/۷m
جرم واحد سطح ساختمان	٤۸٦/۷ kg/m2
ضریب انتقال حرارت کلی دیوارها	۱/٥۳ W/(m2 K)
ضریب انتقال حرارت کلی کف‌ها برای فضاهای غیرقابل تهویه و قابل تهویه	۰/٥۸٦W/(m2 K) ۲/۸۳۹W/(m2 K)
تعداد ٦ پنجره برای هر طبقه	دارای ٦ میلی‌متر گپ آرگون و دارای مساحت ٤ متر مربع
تعداد افراد هر طبقه	۳
روشنایی	٤۳W/m2



شکل ٥ منحنی برق، حرارت و برودت ماهانه ساختمان در کل سال

بهینه‌سازی

در این پژوهش فرایند بهینه‌سازی پارامترهای طراحی

توسط الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار متلب در دو حالت مختلف انجام شده‌است. در حالت اول تعداد محرک اولیه به‌عنوان پارامترهای طراحی درنظر گرفته می‌شود؛ اما در حالت دیگر، تعداد محرک اولیه از پارامترهای طراحی حذف می‌شود و قید انتخاب دو محرک اولیه با ظرفیت‌های متفاوت به فرایند بهینه‌سازی اضافه می‌شود. دلیل این امر، بهره‌برداری بهتر از سیستم در زمانی است که یکی از محرک‌ها نیاز به تعمیر دارد.

جدول (۵) محدودهٔ تغییرات پارامترهای طراحی و جدول (٦) قیود بهینه‌سازی را برای این حالات نشان می‌دهند.

جدول ۵ متغیرهای تصمیم‌گیری الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی سیستم

متغیرهای تصمیم‌گیری و قیود	از	تا
تعداد محرک اولیه	۱	۳
تغییرات ظرفیت نامی محرک اولیه (کیلووات)	$Min(E_{MRMi})$	$Max(E_{MRMi})$
تغییرات ظرفیت گرمایشی بویلر (کیلووات)	۰	۱۰۰۰
تغییرات ظرفیت سرمایشی چیلر تراکمی (کیلووات)	۰	۱۰۰۰
تغییرات ظرفیت سرمایشی چیلر جذبی (کیلووات)	۰	۱۰۰۰

جدول ٦ قیود بهینه‌سازی در الگوریتم ژنتیک

پارامترها	مقادیر	علت محدودیت
تعداد جمعیت	۹٤	شرط هم‌گرایی
نحوهٔ انتخاب	یکنواخت	شرط هم‌گرایی
تناسب مقیاس	رندم	شرط هم‌گرایی
احتمال ترکیب ژنی	۰/۸۵	شرط هم‌گرایی
نوع جهش	–	وابسته به محدودیت
مینیمم نرخ جهش	۰/۰۰۰۵	محدودیت نوع جهش
نرخ جهش اولیه	۰/۰۰۵	محدودیت نوع جهش
معیار توقف	۱۰-٦	شرط هم‌گرایی

جدول ۷ نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش MRM & REUAB با فرض انتخاب تعداد محرک اولیه به‌عنوان پارامتر طراحی

روش MRM_h و REUAB		روش MRM_e و REUAB		پارامتر
$E_{nom,}$	$E_{nom,1}$	$E_{nom,2}$	$E_{nom,1}$	پارامتر ظرفیت نامی محرک اولیه
۳۰۳	۲۲	۸۷	۳٤	ظرفیت نامی محرک اولیه (کیلووات)
۱۹۹/۲		٤٦۳/۳		ظرفیت بویلر (کیلووات)
۳۵۲/۷		۵۳۷/۵		ظرفیت چیلر الکتریکی (کیلووات)
۲۹۸/۳		۱۱۳/۵		ظرفیت چیلرجذبی (کیلووات)
۸۸/۱		۹٤/۹		ماکزیمم سود سالیانهٔ یکنواخت نسبی ۱۰^{۳}× (\$/year)

جدول ۸ نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش MRM & REUAB با قید انتخاب یک محرک اولیه

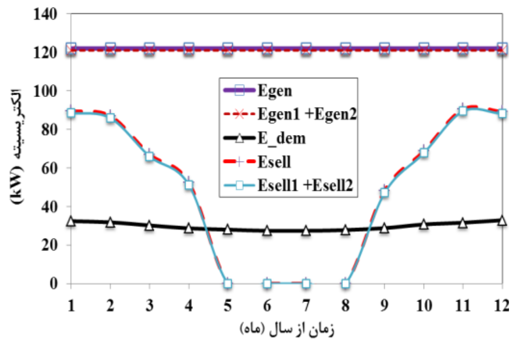
روش MRMh و REUAB	روش MRMe و REUAB	پارامتر
E_{nom}	E_{nom}	پارامتر ظرفیت نامی محرک اولیه
۳۲۳	۱۲۲	ظرفیت نامی محرک اولیه (کیلووات)
۲۰۳/۵	٤٦۲/۸	ظرفیت بویلر (کیلووات)
۳۵۵/۷	۵۳۷/۲	ظرفیت چیلر الکتریکی (کیلووات)
۲۹۵/۳	۱۱۳/۸	ظرفیت چیلرجذبی (کیلووات)
۳۱۸/۵	۳۲۷/۵	ماکزیمم سود سالیانهٔ یکنواخت نسبی ۱۰۳× (\$/year)

بحث و نتایج

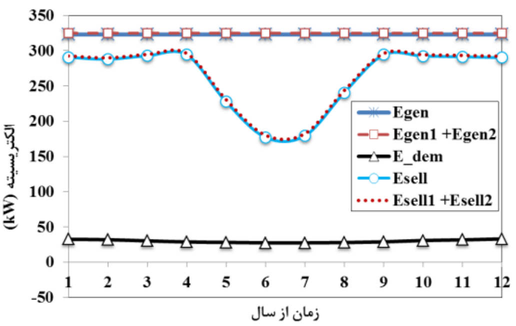
روند پیاده‌سازی روش ماکزیمم مستطیل برای دو حالت عملکرد الکتریکی و حرارتی در شکل‌های (۱ و ۲) ارائه شده‌است. این منحنی‌های تجمعی از منحنی بار حرارتی، سرمایشی و الکتریسیتهٔ مطالعهٔ موردی در شکل (۵) به‌دست آمده‌است و محدودهٔ ظرفیت پیشنهادشده برای محرک اولیه توسط روش

ماکزیمم مستطیل، به‌عنوان محدودۀ تغییرات پارامتر طراحی ظرفیت موتور گازسوز در جدول (۵) استفاده شده‌است. جدول (۷ و ۸) نتایج حاصل از روش ترکیبی MRM & REUAB را به‌همراه مقدار تابع هدف در دو فرایند بهینه‌سازی مختلف (برای چهار حالت) نشان می‌دهد. در جدول (۷) که مربوط به حالتی است که تعداد محرک اولیه به‌عنوان پارامترهای طراحی درنظر گرفته‌شده و فرایند بهینه‌سازی این قابلیت را دارد تا تعداد مختلف و چیدمان‌های متفاوتی از ظرفیت محرک‌های اولیه را بررسی نماید. حالت دوم که در جدول (۸) ارائه شده، مربوط به حالتی است که با اعمال یک قید، فرایند بهینه‌سازی، تنها به انتخاب یک عدد محرک اولیه، محدود می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در همۀ حالت‌ها سود سالیانه یکنواخت نسبی مثبت به‌دست آمده‌است که این نشان‌دهندۀ نقش مؤثر سیستم CCHP در کاهش هزینه‌های تأمین گرمایش، سرمایش و الکتریسیتۀ مجتمع مورد نظر نسبت به سیستم سنتی (مطابق با رابطۀ ۵) می‌باشد. با مقایسۀ دقیق‌تر مشاهده می‌شود که در حالت عملکرد الکتریکی، سود سالیانه بیشتری نسبت به حالت عملکرد حرارتی به‌دست می‌آید و بیشترین سود سالیانۀ یکنواخت نسبی مربوط به حالت انتخاب یک محرک اولیه با ظرفیت E_{nom} =۱۲۲ kW می‌باشد این درحالی است که تعداد محرک اولیه به‌عنوان پارامتر طراحی برای این حالت درنظر گرفته شده‌است. درادامه برای ارزیابی بهتر این روش در دو حالت، به بررسی پوشش‌دهی بارهای مورد نیاز ساختمان پرداخته می‌شود.

شکل‌های (٦ و ۷) الکتریسیتۀ سالانۀ تولیدشده به‌همراه الکتریسیتۀ فروخته‌شده را در دو حالت انتخاب برای محرک اولیه و در دو حالت عملکردی روش ماکزیمم مستطیل با تابع هدف REUAB، نشان می‌دهند به‌طوری‌که میزان الکتریسیتۀ تولیدشده متناسب با ظرفیت انتخابی در هر روش و در شرایط ایده‌آل (دما و ارتفاع سطح دریا) به‌دست آمده‌است.



شکل ٦ الکتریسیتۀ سالانۀ تولیدشده و الکتریسیتۀ سالانۀ مورد نیاز به‌همراه الکتریسیتۀ فروخته شده، $REUAB \& MRM_e$



شکل ۷ الکتریسیتۀ سالانۀ تولیدشده و الکتریسیتۀ سالانۀ مورد نیاز به‌همراه الکتریسیتۀ فروخته شده، $REUAB \& MRM_h$

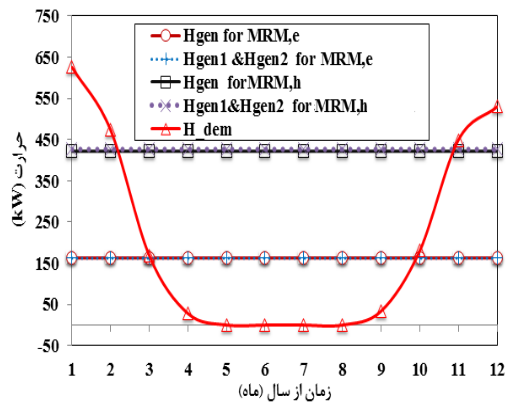
نتایج نشان می‌دهد که با وجود عملکرد محرک‌ها در بار نامی و تولید توان الکتریکی ثابت توسط سیستم CCHP، میزان الکتریسیتۀ فروخته‌شده ثابت نیست. علت این امر، پوشش‌دهی بخشی از الکتریسیتۀ تولیدی به‌منظور تأمین سرمایش الکتریکی می‌باشد به‌طوری‌که در ماه‌های گرم سال این نیاز به بیشترین مقدار خود می‌رسد. به‌همین علت فروش الکتریسیته در این ماه‌ها کاهش می‌یابد.

همچنین نتایج نشان می‌دهد که میزان الکتریسیتۀ تولیدشده در دو حالت انتخابی برای محرک اولیه و نیز دو حالت عملکرد الکتریکی و حرارتی، تقریباً برابر می‌باشد که این نشان‌دهندۀ نقش مؤثر تابع هدف در

انتخاب تعداد محرک اولیه برای الکتریسیتهٔ تولیدی معین است زیرا در این تابع کلیهٔ هزینه‌ها نظیر هزینه‌های اولیه، تعمیر و نگه‌داری و عملکرد به‌همراه هزینه‌های اسقاطی درنظر گرفته شده‌است. به‌طوری‌که می‌توان گفت برای پوشش‌دهی منحنی‌ها شرط انتخاب ماکزیمم سود این شرایط را به وجود آورده‌است.

از مقایسهٔ دو حالت عملکرد الکتریکی و گرمایی روش ماکزیمم مستطیل مشاهده می‌شود باوجودی‌که روش MRM_h با تابع هدف RUEAB میزان الکتریسیتهٔ بیشتری برای فروش دارد ولی مطابق با جدول‌های (۷ و ۸) سود سالیانهٔ بالاتری را به‌همراه ندارد. به‌عنوان مثال باوجودی‌که در حالت دو انتخاب برای محرک اولیه بیشترین امکان فروش الکتریسیته وجود دارد اما کمترین میزان سود سالیانه را به‌همراه دارد. علت این موضوع مربوط به هزینهٔ اولیهٔ تجهیزات به‌خصوص محرک اولیه می‌باشد چون با افزایش ظرفیت محرک اولیه درست است که امکان فروش برق بالا می‌رود اما درمقابل هزینه‌های اولیهٔ آن نیز افزایش می‌یابد.

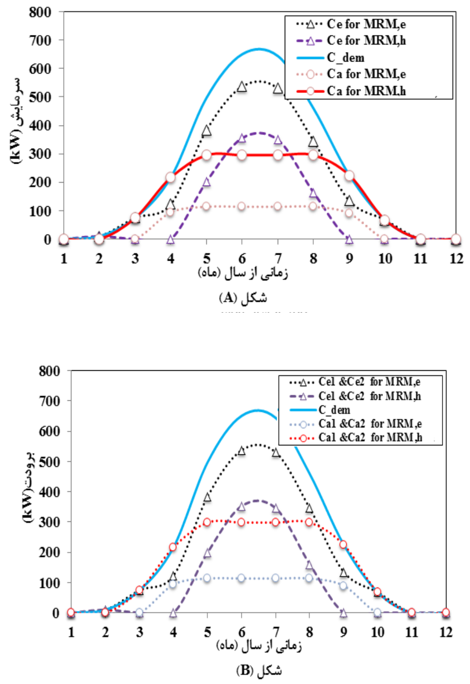
شکل (۸) میزان گرمای دریافتی از محرک‌های اولیه را در دو حالت عملکردی روش ماکزیمم مستطیل و نیز دو حالت انتخابی برای محرک اولیه نشان می‌دهد.



شکل ۸ میزان گرمای سالانهٔ مورد نیاز به‌همراه گرمای دریافتی از محرک‌ها، با روش MRM & REUAB

به‌طور کلی افزایش ظرفیت محرک اولیه، افزایش گرمای دریافتی را به‌همراه خواهد داشت که این در نتایج هم مشهود است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمام حالات مربوط، میزان حرارت دریافتی از محرک‌ها ثابت است که علت آن عملکرد محرک‌ها در بار نامی است اما همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان گرمای تولیدشده در حالت MRM_h در هر دو حالت انتخابی بیشتر از MRM_e می‌باشد که این باعث کاهش در ظرفیت بویلر خواهد شد؛ زیرا ماکزیمم اختلاف میزان حرارت دریافتی از حرارت مورد تقاضای ساختمان تعیین‌کنندهٔ ظرفیت بویلر پشتیبان خواهد بود که این سیستم باید آن را جبران نماید. از طرفی، اگر گرمای دریافتی بیشتر از گرمای مورد تقاضا باشد، این مقادیر اضافی برای تأمین سرمایش توسط چیلر جذبی به مصرف می‌رسد. به‌طوری‌که ماکزیمم این مقادیر تعیین‌کنندهٔ ظرفیت چیلر جذبی خواهد بود.

همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد ظرفیت چیلر جذبی را ماکزیمم حرارت اتلافی در ماه‌های گرم سال تعیین خواهد کرد که در شکل (۹) میزان این سرمایش مهیاشده توسط چیلر جذبی به‌همراه سرمایش مهیاشده توسط چیلر الکتریکی نشان داده شده‌است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در روش MRM_h&REUAB (شکل B) در هر یک از حالات، سرمایش مهیاشده توسط چیلر جذبی بالاتر از MRM_e&REUAB (شکل A) می‌باشد که علت آن ظرفیت‌های انتخاب‌شده برای محرک اولیه و درنتیجه میزان حرارت خروجی از آنها است. این روند برای چیلر الکتریکی فرایند معکوسی دارد چون مابقی سرمایش را چیلر الکتریکی باید مهیا کند؛ به‌طوری‌که ماکزیمم مقدار کمبود سرمایش مهیاشده توسط چیلر جذبی، تعیین‌کنندهٔ ظرفیت چیلر الکتریکی است.



شکل ۹ میزان سرمایش سالانهٔ مورد نیاز به‌همراه سرمای مهیاشده توسط چیلر جذبی Ca و الکتریکی Ce، با روش MRM & REUAB

بهینه‌سازی سیستم در شرایط واقعی با تأثیر دما و ارتفاع محیط. از آن‌جا که مکش هوا برای محرک اولیهٔ موتور گازسوز امری ضروری است، بنابراین خصوصیات هوا ازجمله دما و فشار، تأثیر به‌سزایی برروی عملکرد واقعی سیستم خواهد داشت. به‌عنوان نمونه، بالا بودن بیش از حد دمای محیط، به مرور زمان موجب ذوب شدن تاج پیستون می‌گردد. بنابراین در حالت مطلوب دمای محیط نباید از ۵۵ درجهٔ سانتی‌گراد تجاوز کند و درصورت افزایش دمای محیط عملکرد موتور کاهش می‌یابد [27].

در این پژوهش به‌منظور نزدیک تر شدن به شرایط واقعی اثر این دو پارامتر در نتایج بهینه‌سازی بررسی شده‌است. در واقع فرض شده‌است که بازده و توان موتورهای گازسوز به‌ازای هر ۵/۵ درجه افزایش در دمای هوای محیط، به میزان ٪۱ کاهش پیدا می‌کنند. این تغییرات می‌تواند توسط رابطهٔ زیر تخمین زده می‌شود [8, 26, 27].

$$\frac{f(T)}{f_{nom}} = (1 - 0.01\frac{T-25}{5.5}) \qquad (۱۷)$$

همچنین، افزایش ارتفاع، به‌ازای هر ۳۰۳ متر (۱۰۰۰فوت)، ۰/۰۳ بازده را کاهش می‌دهد [8, 27, 28].

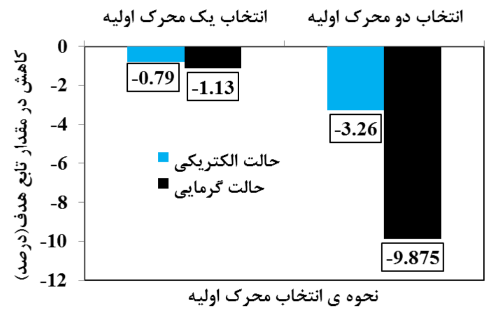
جدول (۹) نتایج مربوط به درصد تغییرات پارامترهای طراحی را تحت اعمال شرایط واقعی در فرایند بهینه‌سازی برای حالت عملکردی الکتریکی نشان می‌دهد.

جدول ۹ درصد تغییرات پارامترهای طراحی و مقدار تابع هدف با پیاده‌سازی روش MRM & REUAB در شرایط واقعی

پارامتر	درصد تغییرات حاصل از اعمال روش REUAB & MRMe
محرک اولیه(درصد) ظرفیت	+۱۰/۷
ظرفیت بویلر (درصد)	-۱۱/۷۳
ظرفیت چیلر الکتریکی (درصد)	-۱۰
ظرفیت چیلرجذبی (درصد)	+۹/٦
REUAB (درصد)	-۰/۷۹

با مقایسهٔ نتایج حاصل از حالت واقعی و حالت ایده‌آل مشاهده می‌شود که مقدار ظرفیت نامی موتور گازسوز به‌میزان ۱۰/۷ درصد نسبت به حالت ایده‌آل افزایش یافته‌است. درواقع به‌منظور بهینه بودن شرایط، فرایند بهینه‌سازی ظرفیت ۱۳۵ کیلوواتی برای موتور گازسوز پیشنهاد می‌شود؛ زیرا با تأثیر دما و ارتفاع که باعث کاهش بازده محرک اولیه می‌شوند، میزان الکتریسیته و گرمای دریافتی از محرک اولیه تغییر می‌یابد و این تغییر در ظرفیت دیگر تجهیزات مؤثر خواهد بود. با مقایسهٔ مقادیر تابع هدف (REUAB) در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که اعمال شرایط واقعی تابع هدف را کاهش می‌دهد؛ زیرا، دما و ارتفاع محیط نصب‌شدهٔ سیستم CCHP باعث کاهش بازده محرک اولیه می‌شود، درنتیجه الکتریسیته و گرمای دریافتی از

محـرک را کـاهش خواهـد داد؛ بنـابراین بـه‌منظـور پوشش‌دهی منحنی‌های بار مورد نیاز ساختمان، خریـد الکتریسیته از شبکه و سوخت، به‌منظور تولیـد حـرارت توسط بویلر مورد نیاز خواهد بود.



شکل ۱۰ میزان تغییرات درصدی مقدار تابع هدف با اعمال شرایط واقعی در حالت‌های مختلف

هرچند علت دیگر آن را می‌توان هزینهٔ اولیهٔ واحد تولید توان دانست؛ زیرا عمـدهٔ هزینـهٔ سیسـتم CCHP نسبت به سیستم سنتی، هزینهٔ واحد تولید توان می‌باشد و چون در حالت واقعی ظرفیت انتخابی بـرای محـرک اولیـه افـزایش مـی‌یابـد، درنتیجـه طبـق روابـط (۵ و ٦) از سود حاصل کاسته خواهد شد.

بهینه‌سازی سیستم با تغییر در قیمت حامل‌های انرژی. در این بخش نتایج بهینه‌سازی با افزایش ۱۰ درصد قیمت حامل‌های انرژی نسبت به قیمت پایه در روش MRM_e & REUAB ارائه شده‌است. علت انتخاب این رونـد، مقایسهٔ نتـایج ایـن روش بـا روش REUAC می‌باشد.

نتـایج بهینـه‌سـازی، نشـان مـی‌دهـد کـه افـزایش ۱۰ درصدی قیمت حامل‌های انرژی مقدار تابع هـدف را ۸ درصد، ظرفیت موتـور گازسـوز را ۲۲ درصـد و ظرفیت چیلر جذبی را تا ۳۳ درصد افـزایش مـی‌دهـد. درحالی‌کـه ظرفیـت بـویلر ۸ درصـد و ظرفیـت چیلـر الکتریکـی ۱۷ درصـد نسـبت نتـایج بهینـهٔ روش MRM_e&REUAB کاهش خواهد یافت. درواقع رونـد افزایشی (برای ظرفیت موتور گازسوز، چیلـر جـذبی و مقدار تابع هدف) و کاهشی (بـرای چیلـر الکتریکـی و بویلر) در دیگر مراجع [16] ارائه شده‌اسـت؛ امـا نکتـهٔ قابل‌توجه میزان افزایش ظرفیت نامی موتور گازسـوز و تابع هدف می‌باشد؛ زیرا این مقادیر در مراجع دیگر تـا ۳۳/۳ درصد برای موتور گازسوز و ۸ درصد برای تـابع هدف، در ۱۰ درصد افزایش قیمت حامـل‌هـای انـرژی نیز گزارش شده‌است. ایـن بـدین معنـی اسـت کـه بـا افزایش ۱۰ درصدی قیمت حامل‌های انرژی، بـه‌منظـور دست‌یابی به بیشترین مقدار تابع هـدف، بایـد ظرفیـت محرک اولیه ۳۳/۳ درصد بیشتر از ظرفیت محرک اولیهٔ موجود انتخاب شـود. امـا بـا روش ارائـه‌شـده در ایـن پـژوهش ایـن مقـدار بـه ۲۰ درصـد کـاهش مـی‌یابـد درحالی‌که میزان افزایش سود حاصل (۸ درصد) ثابـت می‌ماند. این نتیجه نشان می‌دهد که روش ارائه‌شـده در پیش‌بینی افزایش قیمت حامل‌هـای انـرژی موفـق‌تـر از دیگر روش‌ها می‌باشد به‌طوری‌که این افـزایش قیمـت، مستلزم هزینهٔ اضافی نخواهد شد.

نتیجه‌گیری

دست‌یابی به سیستم‌های تولید همزمان بـا تـراز انـرژی بالا می‌تواند در بعضی موارد هزینه‌های اقتصادی بالایی را در پی داشته باشد که ممکن است نسـبت بـه هزینـهٔ تولید سنتی انـرژی، صـرفهٔ اقتصـادی مناسـبی نداشـته باشد؛ لذا استفاده از روش‌هایی کـه بتوانـد بـین تولیـد بالای انرژی و هزینه‌های معادل، توازن و تعادل منطقـی برقـرار کنـد، امـری ضـروری اسـت. ازایـن‌رو در ایـن پژوهش به معرفـی سـه روش مـاکزیمم بـار (MLM)، مـاکزیمم مسـتطیل (گرمـایی MRM_h و الکتریکـی MRM_e) و سود سالیانهٔ یکنواخـت نسـبی (REUAB) در تعیین ظرفیت تجهیزات سیستم‌های تولید هـم‌زمـان برق حرارت و برودت پرداخته شـد. درحقیقـت روش چندمعیارهٔ سود سالیانهٔ نسبی، هزینه‌های سیسـتم تولیـد

هم‌زمان را نسبت به سیستم سنتی (که با روش ماکزیمم بار تعیین ظرفیت می‌شود) می‌سنجد و روش ماکزیمم مستطیل تعادل منطقی به‌منظور تأمین نیاز ساختمان برقرار می‌کند. به‌منظور بهینه‌سازی سیستم CCHP، برای یک مجتمع مسکونی با محرک اولیهٔ موتور گازسوز از هر سه روش استفاده شد و روش جدیدی تحت نام MRM_i&REUAB ارائه شد. نتایج نشان داد که با اعمال این روش نه‌تنها محدودیت‌های روش‌های گذشته اعمال می‌شود بلکه فرایند بهینه‌سازی با تغییر قیمت حامل‌های انرژی در هر ماه کارایی دارد و نیازی به ثابت فرض نمودن قیمت حامل‌ها در کل سال نیست؛ به‌طوری‌که سیستم طراحی‌شده قادر است کلیهٔ نیازهای ساختمان را پوشش دهد و دارای سود سالیانهٔ مثبت باشد.

با مقایسهٔ حالت‌های بهینه‌سازی، مشاهده می‌شود که ماکزیمم سود سالیانه در همهٔ حالات مربوط به انتخاب یک محرک اولیه برای سیستم CCHP به‌دست می‌آید و عملکرد سیستم در حالت الکتریکی سود بیشتری را نسبت به حالت حرارتی متناظر خود کسب می‌کند؛ درصورتی‌که پوشش‌دهی حالات مربوط به حرارتی بیشتر از حالات مربوط به الکتریکی می‌باشد. درنهایت نتایج بهینه با اعمال شرایط واقعی برای موتور گازسوز نشان داد که طراحی سیستم CCHP بدون درنظر گرفتن شرایط واقعی عملکرد واحد تولید توان (دما و ارتفاع محیط) می‌تواند گمراه‌کننده باشد به‌طوری‌که بهینه‌سازی پارامترهای طراحی، نزدیک به ۱۰ درصد خطا خواهند داشت و نیز سود حاصل بیشتر از حالت واقعی گزارش می‌شود.

از طرفی نتایج بهینه‌سازی سیستم با تغییر در قیمت حامل‌های انرژی نشان داد که روش ارائه‌شده، پیش‌بینی بهتری نسبت به روش REUAB در افزایش ده درصدی قیمت حامل‌های انرژی دارد.

نمادها

A	هزینهٔ سالانهٔ اسقاطی ($/year)
AED	الکتریسیتهٔ مورد نیاز تجمعی
ATD	حرارت مورد نیاز تجمعی
C	سرمایش، (kW)
CCHP	سیستم تولید هم‌زمان برق، حرارت و برودت
COP	ضریب عملکرد، (%)
CRF	ضریب سالیانه‌کننده
E	الکتریسیته، (kW)
EUAB	کل هزینه و درآمد سالیانهٔ یکنواخت، ($/year)
F	انرژی سوخت، (kW)
H	گرمایش، (kW)
I	نرخ بهره، (%)
J	شمارندهٔ ماه
K	عمر تجهیزات، (year)
LHV	ارزش حرارتی سوخت، (kJ/kg)
m	جرم،(Kg)
M	هزینهٔ تعمیر و نگه‌داری، ($/kWh)
MLM	روش ماکزیمم بار
MRM	روش ماکزیمم مستطیل
n	تعداد محرک اولیه
NC	ظرفیت نامی، (kW)
R	هزینهٔ اولیهٔ سالیانه‌شده، ($/year)
REUAB	سود سالیانهٔ یکنواخت نسبی، ($/year)
SV	هزینهٔ اسقاطی در سال جاری، ($/kWh)
Trad	سیستم متداول (سنتی)

علائم یونانی

ε	جریمهٔ انتشار آلاینده‌ها، ($/kg)
η	بازده، (%)
ρ	هزینهٔ حامل‌های انرژی، ($/kWh)
τ	بازهٔ زمانی، ساعت

زیرنویس

a	جذبی	E	الکتریکی
B	بویلر	F	سوخت
Buy	خرید	Gen	تولیدشده
C	سرمایش مربوط به چیلر (تراکمی یا جذبی)	H	گرمایی
CCHP	سیستم تولید هم‌زمان برق حرارت و برودت	J	تعداد تجهیزات
Dem	مورد نیاز	K	نوع آلاینده/ شمارندهٔ تجهیزات
		Nom	اسمی، نامی
		Sell	فروش
		Trad	سیستم متداول (سنتی)

مراجع

1. Sanaye, S., Ghafurian, M.M. and Dastjerd, F.T., "Applying Relative Net Present or Relative Net Future Worth Benefit and exergy efficiency for optimum selection of a natural gas engine based CCHP system for a hotel building", *J. Nat. Gas Sci. Eng*, Vol. 34, pp. 305–317, (2016).
2. Mostafaeipour, A., Bardel, B., Mohammadi, K., Sedaghat, A. and Dinpashoh, Y., "Economic Evaluation for Cooling and Ventilation of Medicine Storage Warehouses Utilizing Wind Catchers", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 38, pp.12-19, (2014).
3. Tavakoli Dastjerd, F., Tavakoli Dastjerd, M. and Farahat, S., "Investigated of the Performance of CCHP System in Reducing Pollutants Emission NO_x, CO_2 and CO", *23rd Annual International Mechanical Engineering Conference*, Tehran, IRAN,12-14 May, (2015)
4. Sonar, D., Soni, S.L. and Sharma, D., "Micro-trigeneration for Energy Sustainability: Technologies, Tools and Trends", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 71, pp. 790-796, (2014).
5. Boyce, M.P., *"Handbook for Cogeneration and Combined Cycle Power Plants"*, ASME PRESS, (2002).
6. Ghafurian, M.M., Shakib, S.E. and Tavakoli Dastjerd, F., "Modeling and Optimizing of a Combined CHP System, Compression Chiller and Reverse Osmosis Plant (CHP + C + W) in Two Strategies of Connections with Grid", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 37, pp. 1751-1763, (2015).
7. Ebrahimi, M. and Keshavarz, A., "Sizing the Prime Mover of a Residential Micro-combined Cooling Heating and Power (CCHP) System by Multi-criteria Sizing Method for Different Climates", *Energy*, Vol. 54, pp. 291–301, (2013).
8. Sanaye, S., Meybodi Aghaei, M. and Shokrollahi, S., "Selecting the Prime Movers and Nominal Powers in Combined Heat and Power Systems", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, pp. 1177-1188, (2008).
9. Cardona, A. and Piacentino, A., "Methodology for Sizing a Trigeneration Plant in Mediterranean Areas", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, pp. 1665-1680, (2003).

10. Ghafurian, M.M., Tavakoli Dastjerd, F. and Shafiee Mayam, M.H., "Comparison Three Methods in Designing CCHP System for an Industrial of Case Study", *Second National Application Researches in Electrical, Mechanical and Mechatronic Conference*, Tehran, IRAN, 19 February, (2015).
11. Gu, Q., Renc, H., Gaob, W. and Rend, J., "Integrated Assessment of Combined Cooling Heating and Power Systems under Different Design and Management s for Residential Buildings in Shanghai", *Energy and Buildings*, Vol. 51, pp.143-152, (2012).
12. Gibson, C. A., Meybodi, M.A. and Behnia, M. "Optimization and Selection of a Steam Turbine for a Large Scale Industrial CHP (combined heat and power) System under Australia’s Carbon Price", *Energy*, Vol. 34, pp. 1-17, (2013)
13. Maerefat, M. and Shafie, P., "Design of CCHP System for Office Buildings in Tehran and Thermodynamical, Environmental and Economical Evaluation in Comparison to Conventional System", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, pp. 124-134, (2014)
14. Wang, J.J., Zhang, C.F. and Jing, Y-Y., "Multi-criteria Analysis of Combined Cooling, Heating and Power Systems in Different Climate Zones in China", *Applied Energy*, Vol. 87, pp. 1247-1259, (2010).
15. Fumo, N., Mago, P.J. and Chamra, M., "Emission Operational Strategy for Combined Cooling, Heating, and Power Systems", *Applied Energy*, Vol. 86, pp. 2344–2350, (2009).
16. Sanaye, S. and Ghafurian, M.M., "Applying Relative Equivalent Uniform Annual Benefit for Optimum Selection of a Gas Engine Combined Cooling, Heating and Power System for Residential Buildings", *Energy and Building*, Vol. 128, pp. 809-818, (2016)
17. Tavakoli Dastjerd, F., Ghafurian, M.M. and Shakib, E., "Tech Economic Optimization of CCHP System with Rely the Time Value of Money, in Payback Period", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, pp. 254-260, (2015).

۱۸. دستورالعمل مدیریت بار پستها و فیدرهای فشار ضعیف در شبکه‌های توزیع نیروی برق، شماره سند ۲۳۲۳ / ۳۴۲: شرکت توزیع نیروی برق، (۱۳۹۵).

19. Ebrahimi, M. and Keshavarz, A. "Climate Impact on the Prime Mover Size and Design of a CCHP System for the Residential Building", *Energy and Buildings*, Vol. 54, pp. 283-289, (2012).
20. Darrow, K., Tidball, R., Wang, J. and Hampson, A., "Catalog of CHP Technologies", U.S. Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership, March (2015).
21. Oskoonejad, M.M., "*Engineering Economy*", Amirkabir University, Tehran, Iran, Amirkabir Publishing, 4th ed., (2007)
22. http://bahaye_bargh.tavanir.org.ir / Accessed in February, (2015).
23. http://www.nigc-mpgc.ir/ Accessed in February, (2015).
24. http://www.abfasb.ir/main.asp?id=778/ Accessed in February, (2015).
25. Hourly Analysis Program (HAP) 4.20.
26. Tavakoli Dastjerd, F., Ghafurian, M.M. and Shafiei Mayam, M.H., "Investigation of How to Choose Capacity of Gas Engine in Optimization CCHP Systems with GA; Case Study: Water Sports Complex", *AmirKabir Jounrnal of Science & Research Mechanical Engineering*, ASJR-ME, Vol. 48, pp.79-92, (2016)

27. Ghafurian, M.M. and Niazmand, H., "New Approach for Estimating the Cooling Capacity of the Absorption and Compression Chillers in a Trigeneration System", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 86, pp. 89-106, (2018).